



北海道で考えるべき地球温暖化への適応策：水資源リスクへの対応（前編）

著者	中津川 誠
雑誌名	Docon Report
巻	198
ページ	2-7
発行年	2015-06
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008600

北海道で考えるべき地球温暖化への適応策：水資源リスクへの対応（前編）

著者	中津川 誠
雑誌名	Docon Report
巻	198
ページ	2-7
発行年	2015-06
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008600

エッセイ

北海道で考えるべき 地球温暖化への適応策 ～水災害リスクへの対応～

室蘭工業大学大学院くらし環境系領域 教授

中津川 誠

Nakatsugawa Makoto



略歴

1986年 3月 北海道大学修士課程（衛生工学専攻）修了
1986年 4月 北海道開発庁採用 北海道開発局・土木試験所配属
1997年 4月 北海道開発局・石狩川開発建設部・維持管理課長
2001年 7月 北海道開発土木研究所・環境研究室長
2005年 7月 国土交通省・中部地方整備局・豊橋河川事務所長
2007年 10月 室蘭工業大学・建設システム工学科准教授
2012年 10月 室蘭工業大学・大学院工学研究科教授
現在に至る

主著

積雪寒冷地の水文・水資源（分担）、信山社サイテック、1998年
室蘭工大 未来をひらく技術と研究（分担）、北海道新聞社、2014年

主な活動

水文学、河川工学、水環境工学を専門とし、洪水予測、水循環メカニズム、水環境改善などの調査研究に取り組んできた。北海道河川委員会委員長、北海道環境影響評価審議会委員、北海道国土利用計画審議会委員、北海道開発局鶴川・沙流川リバーカウンセラーなどの社会的活動および水文・水資源学会理事（企画事業委員会委員長）、土木学会水工学委員などの学会活動に従事してきた。

1. はじめに

2014年に気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次報告書（AR5）が公表された。IPCC報告書は地球温暖化に関する科学的・技術的・社会経済的な知見をとりまとめたもので、世界の地球環境政策に最も大きな影響力をもつ文書である。報告書は1990年に第1次（FAR）に始まり、四半世紀を経て「ここ数十年で、すべての大陸と海洋において、気候の変化が自然及び人間システムに対して影響を引き起こしている。」と結論付けるまでに至った。

最新のAR5第1作業部会報告書（自然科学的根拠）では、例えば水災害に関しては、21世紀末までに「中緯度陸地などで極端な降水がより頻繁となる可能性が高いこと」などが報告され、「洪水災害」、「土砂災害」といった水災害の頻発、激甚化が示唆された。さらにこのような自然外力に根差す「ハザード」に加え、「暴露」、「脆弱性」といった社会的要因も勘案した「リスク」にどのように適応すべきかの考え方がAR5第2作業部会報告書（影響、適応、及び脆弱性）に示された。このような動きを背景に、我が国、あるいは北海道においても予想されるリスクに対し具体的な適応策を検討さらには策定する段階にきている。

近年、日本全体、また北海道でも気温や降雨、降雪などの気象現象でこれまで経験しなかったような気配を感じる。とくに洪水災害や土砂災害に直結する大雨や融雪に関して近年どのような状況にあるのかを整理し、また、著者の考えている対応策の考え方や概要について紹介したい。

2. 北海道の大雨・融雪と災害の動向

近年、全国的に見ると紀伊半島豪雨（2011）、九州北部豪雨（2012）、伊豆大島豪雨（2013）、広島豪雨（2014）と立て続けに大雨による洪水災害や土砂災害で大きな被害が発生している。一方で北海道は本州に比べて雨量も少なく、このような災害の発生も多くはないと思われるが、最近少し気になる事例が相次いでいる。

2.1 線状降水帯のもたらす大雨による災害

これまで北海道で大雨や洪水をもたらしてきたのは、前線や台風によるものが主体であった。1981年（昭和56年）8月に石狩川流域を中心に大きな災害をもたらした56洪水や、2003年（平成15年）8月の日高豪雨などがその典型例である。しかしながら、最近はいわゆる「線状降水帯」による大雨が目立っている^{1)・2)}。近年では2010年8月の忠別川豪雨をはじめ、2014年8月24日の礼文島の土砂崩れで犠牲者を出した大雨、同年9月11日に道央圏に初めての大雨特別警報が発令された大雨はいずれも「線状降水帯」によるものと言われている。2014年9月の大雨事例では地域によっては総雨量が300mmを超え、道内18市町において避難勧告ないし避難準備情報が発令

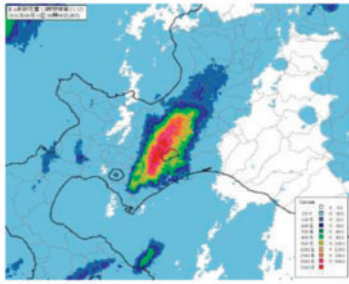


図1 雨量分布図
(2014/9/10 19時～9/11 06時 12時間積算雨量)
(2014/9/11 6:40 気象庁報道発表資料より転載)

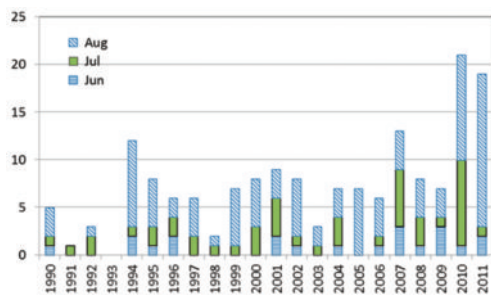


図2 北海道における線状降水帯の発生回数と各年の月別積算回数
(1990～2011)
(北海道大学・山田朋人氏および気象協会・松岡直基氏より原図提供)

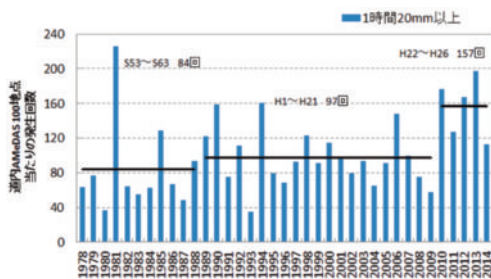


図3 北海道アメダスの1時間20mm以上の短時間強雨の100地点
当たりの年別発生回数 (1978～2014)
(気象協会・松岡直基氏より原図提供)

された。

「線状降水帯」は、上空に季節外れの寒気、下層に湿った暖気が収束する大気条件のもと積乱雲が発達し、図1の例に示すように線状の狭い範囲に強い雨域が形成されるものである。台風や前線などとは違い天気図からは大雨をもたらす要因が明確に判読できないのが厄介なところである。2014年9月の大雨では、天気図上は何の変哲もない低気圧に思えたが、生ぬるい空気の中強い雨が断続的に続き、とても不気味な感じがしたことを覚えている。図2は北海道における線状降水帯の出現数を表したもののだが、統計上でも近年頻度が増しているようにみえる。

図3は北海道内のアメダスでの1時間20mm以上の短時間強雨の100地点当たりの年別発生回数を示したも

ので増加傾向がうかがえる。全国的にも同様の傾向がみられ、北海道でも線状降水帯のような短時間で局地的に降る雨が増えていることが推察される。従来からの台風や停滞前線に加えて大雨の頻度を増やす要因が現れていることは、北海道でも地球温暖化の影響が顕在化していることを意味するのかもしれない。

2.2 融雪期の災害

2012年5月3日～5日にかけての大雨で、北海道の太平洋側の地域を中心に広い範囲で、土砂崩れ、法面崩壊、冠水といった災害が発生した。また、美利河ダムでは、竣工された1991年以降で最大の流入量が生じ、異常洪水時防災操作（大きな出水によりダムの洪水調節容量を使い切る可能性が生じたため流入量と同じ放流量に移行するため放流量を増加する、もしくはダムの洪水調節容量を使い切って流入量と同じ流量を放流する操作。いわゆるただし書き操作）が実施された。一方、多数の土砂災害が発生した中で、札幌市と道南方面を結ぶ国道230号中山峠付近で1969年に開通して以来初めてとなる全面通行止めに至った。図4左は被災現場の状況であるが、この災害において地すべりや盛土法面の崩落が起きた。災害発生後、片側交互通行が開始されるまでに20日間を要し、大型連休中の観光や物流に影響がでた。このような融雪期の大雨には注意が必要である。融雪によって土壌が湿っており、流出量も多い状態に雨による流出が加わるからである。実はこの付近では、2000年5月15日（図4右）にも地すべりが発生している。この際は約200,000 m³の土砂が崩落するという大規模なものであった。

2000年、2012年に共通するのは5月という山間部にはまだ残雪があつて気温が高ければ融雪が盛んに起き、ダム押しのように大雨が降るという状況である。図5は豊平峡ダムへの年および融雪盛期（4～5月）の最大流入量の経年変化を示したものである。中山峠はダム集水域の中にあり、ダム流入量が多いということは土砂災害の誘因となる土壌水分量も大きいものと推察できる。現に2000年、2012年の災害時をはじめ近年は融雪期の流入量の増大傾



提供：北海道開発局

図4 中山峠付近で融雪期に起きた斜面災害
(左：2012/5/4発生 右：2000/5/14発生)

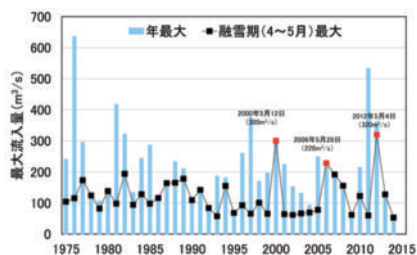


図5 豊平峡ダムの年および融雪期（4～5月）最大流入量（1975～2014）

向が目立つ。なお、2000年5月12日の出水にともない豊平峡ダムでは異常洪水時防災操作（いわゆるただし書き操作）を実施している。

かつては夏から秋にかけての大雨によるいわゆる夏期出水の規模が大きかったが、大きな土砂災害が発生したとの記録はみられない。これは夏期の降雨が散発的であるのに対し、融雪による水分供給が長期にわたって継続する融雪期には土壌が十分に湿っており、そこに降る大雨が土砂災害を引き起こすのではないかと推察できる。急激な気温上昇にともなう雪解けや大雨が気候変化によるものとすれば、それにともなう災害への対応が必要となる。

3. 洪水災害への対応

極端な大雨等に起因する洪水災害に対し、たとえば国土交通省の適応策には、(1) 施設整備による方策、(2) 地域づくりと一体となった方策、(3) 危機管理対応を中心とした方策が挙げられている。

(1) では、ダムや堤防といった新規治水施設の整備が考えられる。もちろん、必要性や効果を適切に評価したうえで不可欠な整備は進めるべきであるが、近年予算面あるいは環境面の制約から新規整備が難しくなりつつある。一方で既存施設の機能を増強もしくは改善するという考え方がある。これならば、機能をどこまで求めるかによるが、コスト面では新規整備よりは安く済みそうである。たとえば、既設ダムのかさ上げなどが挙げられる。このほか、ダム流入予測を活用した事前放流という方法がある。これについてはこの後紹介したい。(2) については、土地利用規制、下水道の機能向上や雨水調整地など流域もしくは地域全体での取り組みである。(3) は、破局的な災害のリスクを最小化する方策で、例えば大雨や洪水をいかに検知予測し、適切な避難行動などで（少なくとも人命への）リスク回避に結び付けるかである。極端現象が増加傾向にある中、その重要性が増している。以上に関連して著者らが取り組んできた洪水災害への対応方策の具体例を紹介する。

3.1 事前放流による既設ダムの治水機能の向上

極端な大雨や融雪期の大雨が懸念される中、既存治水施設の機能向上が求められる。ダムに関して言えば治水容量

と利水容量をあわせもつ多目的ダムでは、治水容量は大洪水が起ると満杯となる可能性がある。そこで、洪水が予想される場合に利水容量内に貯めている水を事前に放流し、治水容量を一時的に増やすことが考えられる。これを「事前放流」と呼ぶ。イメージを図6に表わすが、これをうまく行うためには以下の問題を乗り越えねばならない。

- 1) どの程度の事前放流量が必要かを判断するため、ダムへの流入量の的確な予測が必要である。
- 2) 事前放流したのに雨が降らず、つまり予測が空振りして流入量が予想より少なかった場合でも水不足とならないような判断をおこなう。

1) については、気象庁から提供される予測雨量が利用できる。予測雨量は1時間ごとでは精度が低いものの、数時間以上の積算値であれば利用可能と考えられる。ダムへの流入量は貯まる量がわかればよいので、積算予測値で十分である。図7は石狩川流域の大雨事例について積算予測雨量（リードタイム（LT）24時間）の精度を示したものである。全般的に予測値は実測値を過小評価しているのと、安全側（図の上限線）で考えるならば予測値の2倍程度をとればよいであろう。詳細は白谷らの報文³⁾を参照されたい。これに基づき、事前放流のシミュレーションを行った事例を図8に示す。ここでは予測雨量から推算されるダム流入量と空き容量を比較し、ただし書き操作に至ると判定された場合に事前放流するというルールを適用する。結果は現行操作規則では実施を余儀なくされるただし書き操作を事前放流で回避できることを示している。

2) については、ダム流域にどのくらいの水量が貯留されているかが分かればよい。それは流域の土壌や積雪水中にある水量である。これが分かれば、たとえ予測が空振り



図6 異常な洪水に備えた「事前放流」のイメージ

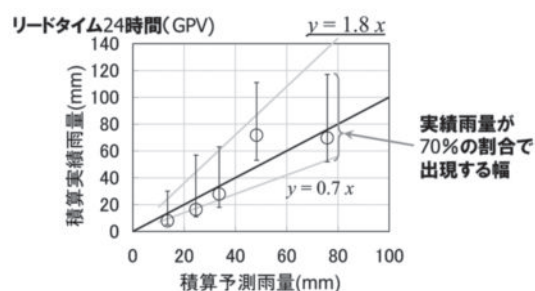


図7 積算予測雨量の精度（2004～2008年の石狩川流域のLT 24時間の降雨予測。ガンマ分布を当てはめて最頻値を○、70%出現範囲をバーチャートで示す）

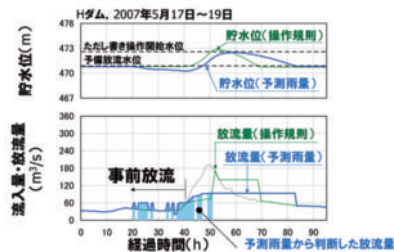


図8 Hダムを対象とした事前放流のシミュレーション（緑線が操作規則に従った場合の放流量・貯水位、青線が事前放流を行った場合の放流量・貯水位）

して利水容量が目減りしても流域からの供給との兼ね合いで回復可能かどうか判定できる。言い換えれば回復可能な水量以内であれば空振りを恐れずに事前放流に踏み込める。この流域内の貯留量もモデルで推算することができる。

3.2 洪水予測の精度向上と PUB

洪水の危険性がある場合、水防や避難対応のためには適切な洪水予測が求められる。これまで、洪水流出計算や予測については多くの手法が提案され、それらの一部は実務にも生かされてきた。しかし一方で、予測雨量の精度やH-Q式（水位・流量変換式）、さらには流出計算モデルの性能など誤差を生み出す要因が絡み合い、計算値を観測値で逐次補正するようなフィードバック手法（たとえばカルマンフィルター法）も導入されてはいるものの、実地上は必ずしも満足のいく結果が得られない場合もあった。

予測精度を左右する要因としてまずは着目すべきは、入力条件となる降雨量である。これに関しては、近年XバンドMPレーダなど高解像度の降雨観測がなされるようになり、局地的豪雨の検知などに目覚ましい進歩を見せている。加えてリードタイムの長い降雨予測にはまだまだ精度の低い例もあるが、数値計算やデータ同化技術などの進歩で徐々に改善がみられている。では、それを受けて流量を出力するモデルはどうであろうか？ ここで問題視したいのは、ある条件下では（パラメータを最適化するなどして）再現性が良いモデルも事例が変わると途端に精度が落ちる例があることである。問題点に事例ごとに变化する流域の湿潤状態を考慮しなければ再現性が向上しないということがある。そこで、図9に示すような手順に従い、流域の湿潤状態を考慮した計算手法を提案する。

- 1) 図10に示すような流域の長期水循環をモデル化し、土壌の湿潤状態を表す「流域貯留量」を求める。著者はこの長期水循環モデルをLoHAS（Long-term Hydrologic Assessment model considering Snow process）と命名した。
- 2) 「流域貯留量」を初期値に、その後の降雨で随時変化する流出率を導入することで土壌水分の状態を考慮した

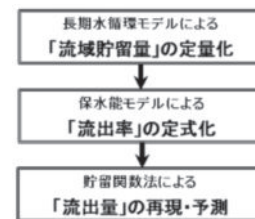


図9 流域貯留量を勘案した洪水流出計算のフロー

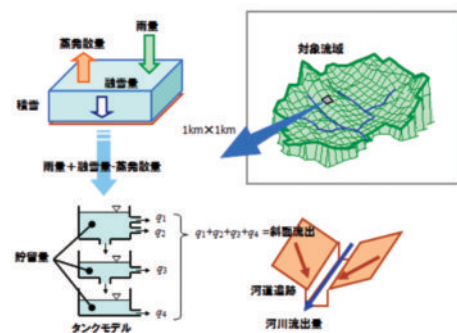


図10 長期水循環計算モデル（LoHAS）と流域貯留量の推算イメージ

洪水流出計算をおこなう。この考え方は今から30年ほど前に山田ら⁴⁾が提案した「保水能モデル」に基づく。

上記手法は長期的に流域貯留量を計算する過程とそれを受けて大雨が降りだした際に洪水流出計算をおこなう過程の2本立てとなっている。なお、後者はすでに北海道開発局の洪水予測システムに導入されている一般化貯留関数等の手法⁵⁾がそのまま利用できる。LoHASで流域貯留量を計算し、流出率に関わる設定を変える過程を加えるだけで、既存システムの体系を大きく変更するものではない。結果の一例⁶⁾を図11に示す。流出率一定で計算した現行モデルと提案モデルを比較すると、湿潤状態が考慮されることで2山目のピークが適切に再現されていることがわかる。さらに図12は流出計算にフィードバック手法（カルマンフィルター）を適用して12時間先までの予測の結果を示したもののだが、提案モデルで改善がみられる。このように、土壌の湿潤状態を適切に評価することで、先行降雨がある場合や融雪期の大雨、2山洪水の後半などが適切に再現、予測できることが期待できる。さらに、洪水予測に関しての「いつでも」といった再現性だけでなく、「どこでも」といったニーズに対しては応えられるであろうか？ 国内の例えば1級河川や都市部を流れる重要河川では流量観測が行われており、流出計算の検証は観測流量ベースで行える。しかしながら、多くの中小河川では観測流量がない。いわゆるPUB（Prediction in Ungauged Basins）の問題である。そのような場合は計算流量を媒介変数としたH-Q関係を求めておき、水位予測を行えばよいと考える。

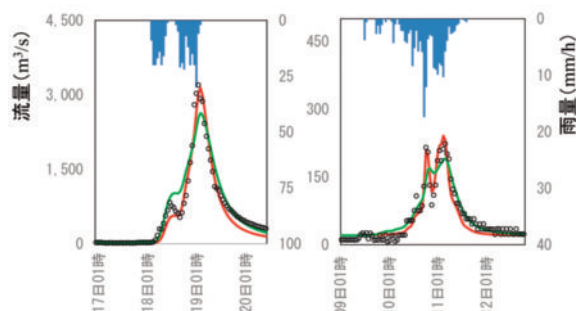


図 11 洪水流出計算の結果（モデルは一般化貯留関数法、緑線は現行モデル、赤線は提案モデルの結果）
（左；沙流川水系・二風谷ダム 2006/8/17～8/20、右；利根川水系・矢木沢ダム 2002/7/9～7/12）

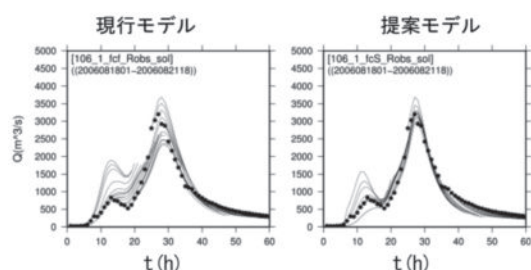


図 12 洪水予測計算の結果（モデルは一般化貯留関数法+カルマンフィルター、予測雨量は実測雨量を使用 ●は実測流量、実線はLT 12 時間までの予測流量の結果）
（沙流川水系・二風谷ダム 2006/8/18～8/21）



図 13 iRIC SRM の表示画面

では、適切な流量計算をおこなうためのモデルパラメータはどうやって決めればよいのであろうか？ この場合のパラメータは地質条件など流出特性と関係性の深い要因から推定できるとよい。GIS を活用すれば地理データアーカイブが充実しているわが国では文字通りどこでも流出計算が可能となると考える。そのような目的意識のもと、著者らは GIS を活用したモデルパラメータ設定の研究を進めている。

流出計算手法に関しては、研究だけでなく普及という観点でも進展があることを紹介したい。だれもが容易に流出計算を行え、流量データが与えられれば最適なモデルパラ

メータが設定できるソルバーである iRIC SRM が 2014 年 7 月に公開された。iRIC ソフトウェアとは産官学のコンソーシアム (iRIC プロジェクト) が提供する水理・水文解析用ソフトウェアで、ユーザー登録するとインターネットを介して「だれでも」無償で解析ソフトの提供が受けられる⁷⁾。図 13 に表示画面の一例を示すが、データ入力だけで容易に計算の実行や結果の可視化ができ、業務や教育などの支援ツールとして幅広い活用ができるものとなっている。

4. 土砂災害への対応

大雨や融雪で起きる土砂災害は「土石流」、「地すべり」、「がけ崩れ（急傾斜地崩壊）」に分類されるが、近年多くの犠牲者や被害を出しており、また今後の気象変化によってさらなる頻発が懸念される。その対策には砂防ダムのような構造物、土砂災害警戒区域など土地利用規制の一層の推進が不可欠といえる。一方、我が国の国土条件や気象条件からみて構造物や土地利用規制だけでは対応がすぐには完備できない状況も多くあると考えられ、避難や通行止めといったいざというときの危険回避行動が最後の砦となる。そのためには適切な土砂災害の発生予測が望まれる。なお、一括りに土砂災害といっても冒頭で述べた通り形態は 1 つではなく、各々発生条件も異なるが、地形・地質を素因、降雨・融雪を誘因とした水と土の作用という面で共通性があるとして、土砂災害と称して話を進める。

土砂災害は、土の中で進行している現象が突然破局的な形で現れてくるため、洪水と違って視覚的に認識することが難しい。そこで、土砂災害の危険性を誘因となる降雨と土の湿潤状態を数値化して判定している。具体的には土砂災害警報の発表に危険度判定図（スネーク曲線）が用いられており、短時間降雨の指標となる 60 分雨量と土壌水分の状態をあらわす土壌雨量指数のプロットが土砂災害発生危険基準線（Critical Line：以下、CL と呼ぶ）を超えるかどうかで危険度が判断される。この手法は実務面では大変利用価値の高いと考えるが、(1) 融雪が考慮されていない、(2) 土壌雨量指数のパラメータは全国一律であるという点が課題として挙げられる。

4.1 融雪を考慮した土壌水分量指数 SWI による評価⁸⁾

融雪期も含めた土砂災害リスクの評価を目的に、土壌雨量指数に降雨量に加えて融雪量を勘案した。これを雨量という表現を拡張し、著者らは土壌水分量指数 ((Soil Water Index)：以下、SWI と呼ぶ) と称する。SWI のイメージを図 14 に示す。SWI の入力値である融雪量は、雪面融雪量を大気・雪面間の熱収支に基づいて求め、それに積雪層の貯留効果を考慮したモデルで地表面供給水量として与える。降雨量は解析雨量（気象庁）を使用し、融雪量

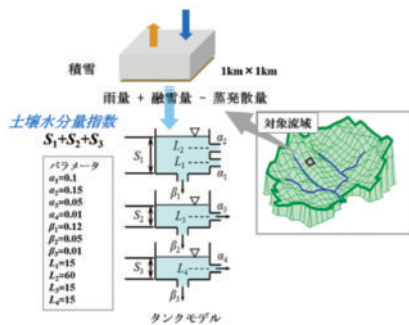


図 14 土壌水分量指数 (SWI) の模式図

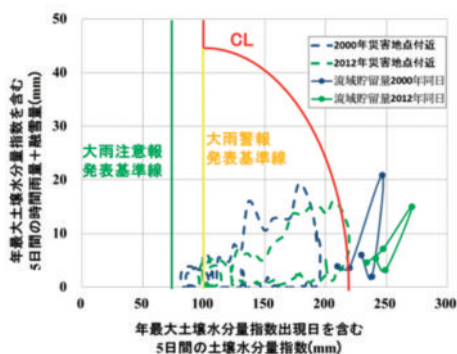


図 15 中山峠地すべり災害発生危険度の評価結果

とともに直列 3 段タンクモデルに入力することでタンク内の残留水を求め、得られた残留水を SWI とする。

4.2 流域の水循環を考慮した流域貯留量による評価⁸⁾

土壌雨量指数でイメージされる流域の貯留効果は、本来流域の地質等で異なると考える。すなわち、流域あるいは土の特性によってモデルパラメータは異なると考えるのが自然である。そこで土壌水分量を表わすタンクモデルの貯留量を流域水循環上の変数と捉え、先に示した図 10 に示したモデルでそれを定量化する。ここでは降雨や融雪、蒸発散といった入力に対し、流域末端の流出量が適切に再現されることをもって土の特性等に依存するモデルパラメータが適切に設定されているとみなす。また、各メッシュのタンク残留水を流域貯留量と称するが、長期的な水循環が再現され、水収支も明確化されることを要件に入力量＝貯留量＋出力量を満たす構造となっている。

図 15 は、2000 年と 2012 年の中山峠付近で起きた土砂災害（地すべり）災害現場の SWI を 1 時間毎に推定し、SWI が年最大値となった日を含む 5 日間のスネーク曲線を示したものである。図中の青色と緑色の破線は、各々 2000 年と 2012 年のスネーク曲線である。また、同色の●印を付した実線は、同日の流域貯留量と日最大時間雨量から作成したスネーク曲線である。SWI で描いたスネーク曲線は、災害が発生したのとはほぼ同じ時点に最大値を示し、危険度判定に効果的であることを示している。一方、

流域貯留量で描いたスネーク曲線は、現状の CL を大きく超えており、より安全側の評価ができています。よって、融雪を考慮しても、また流域特性に応じたパラメータ設定を行えば土砂災害の危険性を適切に判定できることが示された。さらに降雨や融雪の予測情報が与えられれば、避難や通行止めといった事前の対策に活用できると考える。

5. おわりに

北海道でも地球温暖化の影響で今後水災害の発生リスクが高まることが予想され、それへどのように対応すればよいかを検討し、具体化すべきときに来ている。この際、ハザードの強化とともに、対策に使える予算の制約といった面も勘案せざるを得ない。その文脈で予測技術と既存施設の機能向上に着目した「洪水」と「土砂災害」への対応策について試案を交えて示した。今後、このような対策技術の調査研究とともに実務部門と連携して実用化を目指すことで地域の安全に少しでも貢献できればと考える。

謝辞：資料を提供していただいた北海道大学・山田朋人氏、気象協会・松岡直基氏および北海道開発局札幌道路事務所、寒地土木研究所防災地質チームの関係者に謝意を表する。

参考文献

- 1) 松岡直基, 北海道における 2014 年 8 月, 9 月の豪雨の概要について, 北海道の土砂災害に関する緊急セミナー, http://chishitsu.ceri.go.jp/h26_saigai.html
- 2) Yamada T. J., J. Sasaki and N. Matsuoka, Climatology of line-shaped rainbands over northern Japan in boreal summer between 1990 and 2010, *Atmos. Sci. Let.*, 13, pp.133-138, 2012.
- 3) 白谷友秀, 中津川誠, 積算予測雨量に基づいた融雪期におけるダムの洪水調節機能の向上について, 土木学会論文集 B, 66, 3, pp.268-279, 2010.
- 4) 山田正, 山崎幸二, 流域における保水能の分布が流出に与える影響について, 第 27 回水理講演会論文集, pp. 385-392, 1983.
- 5) 北海道開発局建設部河川管理課, (財)北海道河川防災研究センター・研究所, 実時間洪水予測システム理論解説書, pp.396, 2004.
- 6) 谷口陽子, 中津川誠, 白谷友秀, 流域水循環に基づく貯留量を考慮した洪水流出計算の研究, 平成 26 年度土木学会北海道支部論文報告集, 71, B-15, 2015.
- 7) iRIC Project, <http://i-ric.org/ja/>
- 8) 宮崎嵩之, 中津川誠, 川村志麻, 融雪を考慮した土壌水分量の定化に基づく斜面災害リスクの評価, 平成 26 年度土木学会北海道支部論文報告集, 71, B-20, 2015.